

船用钢板激光弯曲成形中板材几何效应的数值模拟

吕波 张立文 裴继斌 钟琦 王存山 张国梁

大连理工大学材料系

船用钢板激光弯曲成形中板材几何效应的数值模拟

Numerical Simulation of Geometrical Effects on Process of Laser Bending of Shipbuilding Sheet Metal

吕波¹ 张立文¹ 裴继斌¹ 钟琦¹ 王存山² 张国梁¹

1.大连理工大学材料系

2.三束材料改性国家联合重点实验室

摘 要: 使用有限元分析软件 MSC.Marc 对船舶钢板的激光弯曲成形过程进行数值模拟, 建立了板材激光弯曲的三维弹塑性非线性有限元热力耦合数值模型, 计算了船用钢板激光弯曲成形过程的温度场和变形场。模拟结果与试验结果符合较好。在此基础上, 对船舶钢板的激光弯曲成形中板材的几何效应进行了数值模拟研究, 得出在特定条件下各技术参数与激光弯曲变形量之间的定量关系, 为实际生产中制定和优化钢板激光弯曲成形的主要参数提供理论依据。

关键词: 船用钢板 激光弯曲成形 几何效应 数值模拟 非线性有限元

Abstract: Numerical simulation of laser bending of shipbuilding sheet metal was carried out at the advantage of finite element analytical software MSC.Marc and a 3-D elasto-plastic thermo-mechanical finite element model was developed. The temperature field and the displacement field of laser-bending forming of shipbuilding sheet metal were calculated using the model. The simulation results were in good agreement with experimental results. After that, geometrical effect of sheet was simulated numerically and the definite relationship between displacement of plate and technical parameters on the certain conditions during the laser forming process was achieved. The obtained results could provide theoretic basis for engineering application of this technology in the future.

Key word: Shipbuilding sheet metal, Laser bending, Laser forming, Geometrical effect, Numerical simulation, Nonlinear FEM

1 引言

激光弯曲成形方法是一种新型金属板材柔性成形技术。这一成形方法将激光加工技术应用到热应力成形技术中, 以相干性好、方向性好、易于精确控制的高能激光束作为热源, 利用激光束快速扫描金属板材表面时形成的不均匀温度场所导致的热应力来实现板材的塑

性变形^[1-4]。由于激光弯曲成形是一个复杂的三维弹塑性热力耦合过程，其最终变形量是多种因素综合作用的结果，而且由于温度对材料特性的影响以及激光加热瞬间板材温度的迅速变化等特点，使得采用传统的计算方法和实验手段来研究激光成形过程的规律变得十分困难。采用数值模拟技术可以在计算中可以考虑各种随温度变化的物性参数，不必花费大量人力、物力对实物解剖，而且得到更全面的信息，国内外学者已经对一些材料的激光弯曲成形的数值模拟开展了许多研究^[5-9]。目前船用钢板的弯曲成形基本上采用水火弯板技术，若能用激光这种易于控制的热源代替水火，成形精度将更容易控制。对船用钢板激光弯曲成形进行数值模拟研究，可以减轻人力物力，优化参数，进而指导生产。

板料的几何尺寸主要包括板料的长度 l （垂直于弯曲线方向的尺寸）、宽度 d （沿弯曲线方向的尺寸）和厚度 t 。由于小长度板料的弯曲问题在实际操作中并不常见，而当长度尺寸大于 10-20 倍板厚时，它对弯曲变形的影响不再明显，因此，板料的宽度和厚度对弯曲变形的影响较大，而在这两者中又以板料的厚度影响最为显著。对于一定大小的激光光斑，当板厚超过某一极限值时，无法进行激光成形。本文在验证了激光弯曲成形数值模拟结果准确性的基础上，应用有限元数值模拟的计算结果，结合一定的实验数据，确定船用中厚钢板激光弯曲成形过程中的包括激光束的能量，板材的几何尺寸以及材料的性能等在内的主要参数与弯曲变形量之间的定量关系，将这些参数对激光弯曲成形的影响规律作定量的讨论，为制定激光弯曲成形的合理的工艺参数组合提供依据。

2 数学模型的建立

对于体积为 V ，表面积为 Γ 的连续介质，可建立能量守恒的热传导微分方程：

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

在工件外表面 Γ 上通常可建立 4 类不同边界条件：表面 Γ_T 上的给定温度 $T = T(x_i, t)$ 、给定热流强度 $q(x_i, t) = \lambda_n \frac{\partial T}{\partial n}$ 、给定对流边界条件 $q = h(T_\Gamma - T_\infty)$ 和热辐射边界条件 $q = \sigma \varepsilon (T_\Gamma^4 - T_\infty^4)$ 。除此还须给定初始时刻的工件温度分布 $T(x_i, 0) = T_0$ 。考虑到热辐射相对于对流散热很小，在本文计算中不考虑热辐射。

在该体积介质中力学平衡条件为：

$$\sigma_{ij,j} = 0 \quad (2)$$

式中， σ_{ij} 为高斯应力分量，包括热应力的影响。

热应变为：

$$\varepsilon_{ij}^T = \alpha_{ij} (T - T_r) \delta_{ij} \quad (3)$$

式中， ε_{ij}^T 为热应变张量； α_{ij} 为热膨胀系数； T_r 为参考温度； δ_{ij} 为算子。

应力应变间的本构关系为：

$$d\sigma_{ij} = D_{ij} (d\varepsilon - d\varepsilon^p - d\varepsilon^T) \quad (4)$$

式中, D_{ij} 为弹性本构张量系数, $d\varepsilon$ 、 $d\varepsilon^p$ 、 $d\varepsilon^T$ 分别为总应变、塑性应变、热应变。

3 有限元模型的建立

模型中采用试板材料为 C20 钢, 采用八节点六面体单元对不同尺寸的板材进行划分, 建立三维热力耦合模型。为提高有限元分析的精度和效率, 在热影响区附近将网格加密, 其它区域保持疏松网格, 如图 1 所示。激光参数为功率 $P=1000W$, 光斑大小为 $8 \times 8mm^2$, 扫描速度为 $7.5mm/s$ 。材料对激光的吸收系数为 0.65 。

(1) 热源 激光束作为外加表面热流载荷输入。通过用户子程序描述激光束的连续

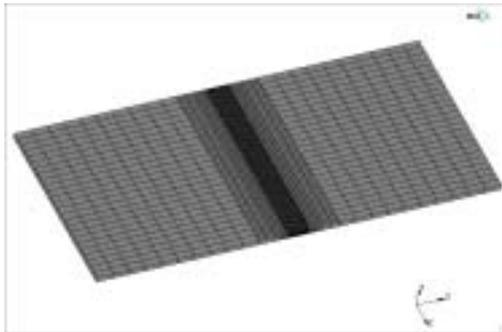


图 1 模型有限元网格划分

扫描, 使激光热载荷以热流密度的形式施加到相应单元上。采用热流均匀分布的方形光斑, 其能量密度分布 I 为

$$I = AP/d^2 \quad (5)$$

式中 A 为材料对激光的吸收系数, P 为激光束的输出功率, d 为激光光斑宽度。

(2) 边界条件 固定激光源, 板沿 Z 的方向以匀速 v 平动。约束板材一端单元的所有节点 X 和 Y 方向的自由度, 以避免板材发生刚

体位移, 这与板材激光弯曲成形过程的实际情况一致。板材经激光束扫描后在空气中自然冷却, 只考虑板材表面与空气的对流换热, 而不考虑热辐射。对流换热边界条件为:

$$q_h = h(T - T_0) \quad (6)$$

式中 h 是表面对流换热系数。初始条件: $T_0=25^\circ C$ 。

(3) 材料热物性参数 材料的热物性参数和力学性能参数均为温度的函数, 均取自文献[9]。对未知温度范围内的材料性能按插值法确定, 其变化关系见图 2、图 3 所示。

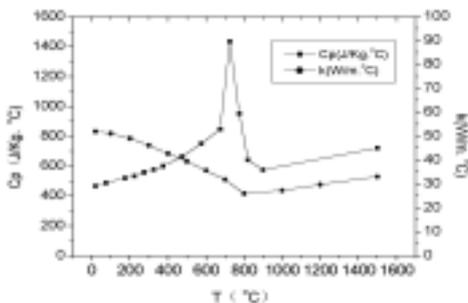


图 2 热物性参数

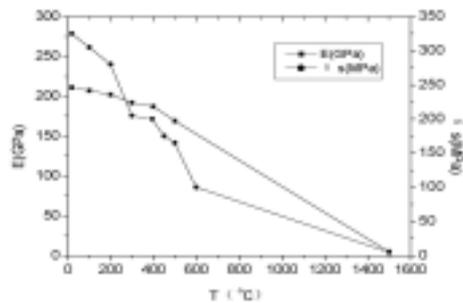


图 3 力学性能参数

4 模拟结果与分析

4.1 板材厚度对弯曲变形的影响

根据激光弯曲的温度梯度成形机理，板材在厚度方向上所形成的温度梯度是钢板产生弯曲变形的根本原因。因此板材的厚度对激光弯曲变形的影响尤为突出。图 4 是厚度分别为 4mm, 5mm, 6mm 的钢板激光弯曲的变形规律（图中 P 表示激光功率，V 表示扫描速度，d 表示方形光斑边长）。

由图 4(a)可以看出，随着厚度的增大，钢板的弯曲变形量逐渐减小。6mm 钢板和 5mm 钢板的弯曲变形量相近，明显小于 4mm 钢板的弯曲变形量。图 4(b)所示为不同的钢板厚度与最终变形量的关系。

从图中可以看到，在特定的工艺条件下，厚度越大，所获得的最终弯曲变形量就越小。当板厚超过某极限值时，将无法进行激光成形。一方面，板材越厚，受热区域所能产生的温度峰值越低，材料的热膨胀量也越小，同时由于温升引起的屈服应力的下降值也越小。另一方面，板材越厚，弯曲时所需的弯曲力矩也越大，对内部热应力的要求也越高，而由于板材厚度增加造成的过小的应力使钢板难以产生弯曲变形。以上两方面的综合作用使塑性变形量减小。但板材厚度也不能太小，当厚度低于某极限值，材料将发生熔化或烧损，变形量反而减小。所以，对于一组特定的工艺参数，在一定的厚度范围内可以产生合适的弯曲变形。

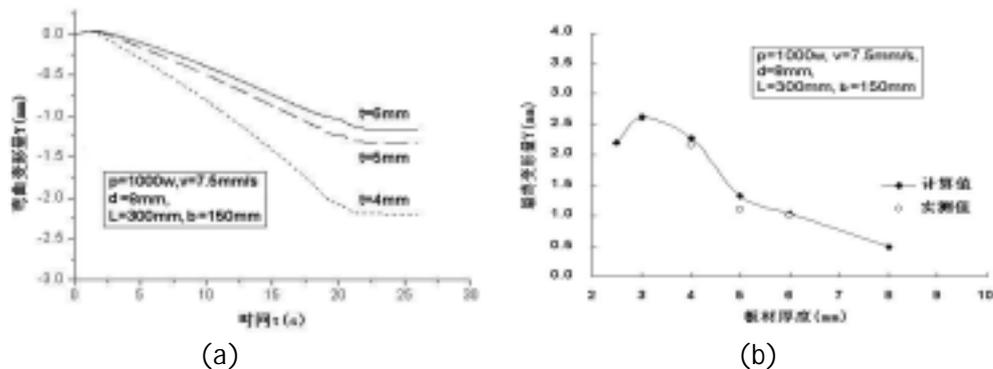


图 4 板材厚度对激光弯曲变形的影响

图 4(b)同时也显示了板材厚度与最终变形量的关系的实验结果，可以看出模拟计算的结果与实验结果基本吻合。

4.2 板材宽度对弯曲变形的影响

图 5(a)所示为宽度不同时的激光弯曲变形随时间的变化规律。图 5(b)表示了板材在长度和厚度尺寸一定的条件下，不同的宽度对激光弯曲变形最终变形量的影响。

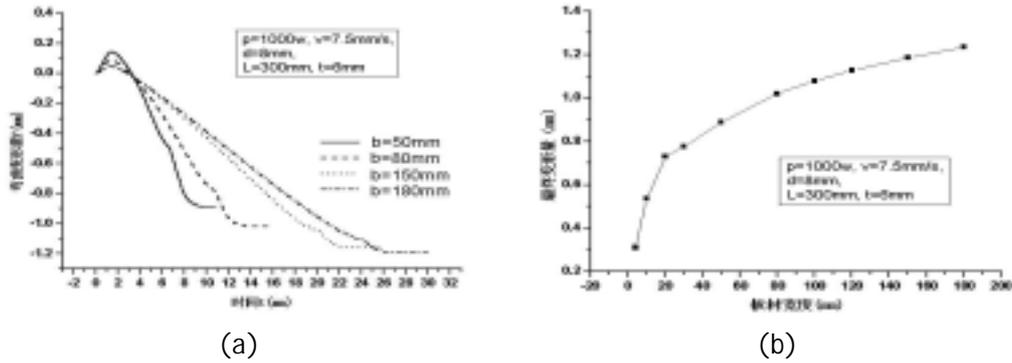
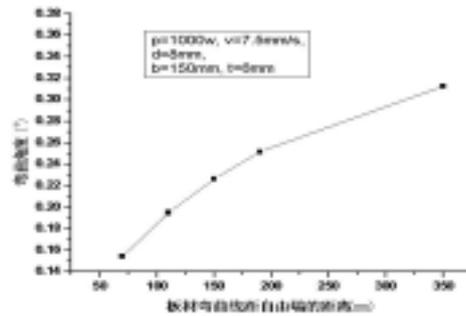


图 5 宽度对板材激光弯曲变形的影响

从图 5(a)和图 5(b)可以看出, 板材的宽度对弯曲变形的影响较大。板材宽度越大, 弯曲成形的最终变形量越大。这是因为激光加热是沿着板材的宽度方向连续进行的, 通常激光束的直径相对板宽很小, 使得同一时刻被加热材料的范围也很小。在特定的工艺下被加热处产生塑性变形时, 其它在宽度方向上没加热到的材料阻碍加热区域材料的变形, 起到了一定的刚端抑制作用。钢板越宽, 刚端作用越明显。又因为刚端对加热过程中弯曲的阻碍作用大于对冷却过程中的正向弯曲的阻碍作用^[1], 所以钢板越宽, 背向激光源的反向弯曲变形量越小, 而朝向激光源的最终弯曲变形量越大。但是当板材的宽度达到某一值后, 刚端作用不再加强, 曲线逐渐趋于平缓。

4.3 板材长度对弯曲变形的影响

在激光弯曲成形中, 当板材的长度尺寸远大于板厚尺寸时, 长度对成形角度的影响不显著。然而, 板材弯曲线距自由端的距离 L' 对激光弯曲角度有一定的影响。图 6 为在一定的工艺条件下, 当钢板厚度和宽度尺寸不变时板材的弯曲线距自由端的距离对激光弯曲成形角度的影响。

图 6 板材弯曲线距自由端的距离 L' 对弯曲角度的影响

图中的曲线表明, 弯曲线到自由端的距离越大, 所获得的弯曲角度越大。因为弯曲线距自由端的距离越大, 自由端对它的约束作用就越大, 弯曲角度就会随之增大。但是, 当 L' 达到某一长度之后, 自由端对它的约束作用不再增加, 则曲线逐渐趋于平缓。

5 结论

- 1). 在板厚相对热源能量不太大的情况下, 激光弯曲变形量随板材厚度的增大而减小。当板厚超过某极限值时, 将无法进行激光成形。
- 2). 在其它参数不变的前提下, 激光弯曲变形量随板材宽度的增加而增大。当板材的宽度达到某一值后, 变形曲线逐渐趋于平缓。加热阶段冷板断面的刚端效应使宽度小的板材对反向弯曲产生较大的抑制作用。

3). 当板材的长度尺寸远大于板厚尺寸时, 长度对变形角度影响不显著。其它参数不变时, 板材弯曲线距自由端的距离 L' 越大, 所获得的弯曲角度越大。

6 参考文献

- [1] Y. Namba. Laser forming of metals and alloys, Proceedings of LAMP, 1987: 601-606
- [2] M. Geiger, F. Vollertsen. The Mechanisms of Laser Forming. Annals of the CIRP, 1993, 42(1): 301-304
- [3] 李纬民, 李春科, 刘助柏. 板料成形新工艺——激光弯曲. 锻压技术, 1993, (6): 29-31
- [4] F. Vollertsen, M. Geiger, Li, W.M.: FDM- and FEM-simulation of laser forming: a comparative study. Advanced Technology of Plasticity 1993, Vol. , ed.: Z.R.Wang, Y.He ,1993. 1793-1798
- [5] Odumodu, Kennedy, Oas, Shuvra. A numerical and experimental analysis of forceless forming using lasers. Computer modeling&simulation in engineering, 1997(8)
- [6] An. K. Kyrsanidi, Th. B. Kermandis, Sp. G. Pantelakis: Numerical and experimental investigation of the laser forming process. Journal of Materials Processing Technology. 1999, 87: 281-290.
- [7] Z. Hu, R. Kovacevic, M. Labudovic. Experimental and numerical modeling of bucking instability of laser sheet forming. International journal of machine tools & manufacture. 2002, 42: 1427-1439
- [8] 季忠, 焦学健, 吴诗. 板料激光弯曲成形动力显示有限元模拟. 应用基础与工程科学学报, 2001, 9(2-3): 208-214
- [9] 张立文, 钟琦, 裴继斌, 夏元良, 张国梁. 船舶钢板激光弯曲成形过程的有限元数值模拟. 2002 中国机械工程学会年会, 2002. 11